

Climatology of Surface Albedo at Camagüey Actinometric Station

Climatología del albedo de superficie en la Estación Actinométrica de Camagüey

I. Y. Platero Morejón*, R. Estevan Arredondo, F. García Parrado

Grupo de Óptica Atmosférica de Camagüey, Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, INSMET

*) E-mail: yipsy@cmw.insmet.cu

Received: 15/05/2015

Accepted: 29/10/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.4.259

ABSTRACT:

Employing 30 years of solar radiation dataset from Camagüey Actinometric Station, the climatology of the Surface Albedo was determined for two solar disk state (Sun and Squared Sun). The obtained mean value for all period is 0.21 with a median of 0.209 and standard deviation of 0.0422. The WMO Guide to Climatological Practices was employed to determine this climatology. The dataset has been subjected to a meticulous quality control process, taking into accounts the criteria of Baseline Surface Radiation Network (BSRN). The annual and multiannual means was established, as well as, the monthly and hourly mean values for the entire sample. The frequency distribution was determined for different combinations of active surface and their relation with the albedo values.

Key words: Surface albedo, solar radiation, BSRN, actinometric stations

RESUMEN:

Empleando 30 años de datos de radiación solar de la Estación Actinométrica de Camagüey, se ha determinado la climatología del Albedo de Superficie para dos estados de disco solar (Sol y Sol al Cuadrado). El valor medio obtenido para todo el período es de 0.21 con una mediana de 0.209 y una desviación estándar de 0.0422. Para la obtención de esta climatología ha sido empleada la Guía de Prácticas Climatológicas de la OMM. La base de datos empleada ha estado sujeta a un meticuloso proceso de control de calidad, tomando en cuenta los criterios de la Red para la Línea Base de Radiación en Superficie (BSRN). Las medias anuales y multianuales han sido establecidas, así como, los valores medios mensuales y horarios para toda la muestra. Se ha determinado la distribución de frecuencias para diferentes combinaciones de la superficie activa y su relación con los valores de albedo.

Palabras clave: Albedo de superficie, radiación solar, BSRN, estaciones actinométricas

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] F. Tena, J. A. Martínez-Lozano, M. P. Utrillas, "Radiación solar ultravioleta y prevención del eritema," *Revista Española de Física* **12**(1), 18-24 (1998).
- [2] A. Porteous, *Dictionary of environmental science and technology*. Revised edition 439 pp, 80 figures, 4 Apendices. Chinchester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley and Sons. 4ta Reimpresión 1994 (1992).
- [3] M. B. Fairbairn, "Planetary Photometry," *J. Roy. Astron. Soc. Can.* **98**, pp. 149 (2004).
- [4] F. Zaratti, R. Forno, G. Gutiérrez, R. Aoaza, F. Velarde, "Medidas de albedo en UV-B en el Salar de Uyuni," *Rev. Boliviana de Física* **17**, pp. 8-12 (2010).

- [5] B. Stefan, D. de Morrison, "Georreferenciamiento y análisis de corrección atmosférica para el cálculo del albedo usando el sensor LANDSAT ETM+," Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, pp. 2143-2150 (2003).
- [6] S. M. Freidenreich, V. Ramaswamy, "A new multiple-band solar radiative parameterization for general circulation models," J. Geophys. Res. **104**, 31389–31409 (1999).
<http://dx.doi.org/10.1029/1999JD900456>
- [7] WMO, *Guide to Climatological Practices*, Second Edition, WMO No. 100, pp 198 (1983).
- [8] WMO, *Guide to Climatological Practices*, 2011 Edition, WMO No. 100, pp 198 (2011).
- [9] R. Acea, Comunicación personal (2011).
- [10] R. Estevan, J. C. Antuña, B. Barja, F. García, C. E. Hernández, T. Hernández, J. Rosas, I. Y. Platero, "Climatología de la Radiación Solar en la Estación Actinométrica de Camagüey, 1981-2010," ICT INSMET, 41 pp. (2012).
- [11] GGO, *Manual para la operación e instalación de instrumentos de radiación solar*, Ed. Guidrometeoizdat, 124 pp., En Ruso (1957).
- [12] GGO, *Manual para la calibración de instrumentos meteorológicos*, Ed. Guidrometeoizdat, 420 pp., En Ruso (1959).
- [13] GOAC, *Manual de procedimientos para la realización de observaciones actinométricas*. INSMET, 25 pp. (2010).
- [14] A. Centella, B. Lapinel, O. Solano, R. Vázquez, C. Fonseca, V. Cutié, R. Baéz, S. González, J. Sille, P. Rosario, L. Duarte, "La sequía meteorológica y agrícola en la República de Cuba y la República Dominicana," PNUD 2007, 172 pp. (2006).

1. Introducción

La radiación solar es la principal fuente de energía para los procesos que tienen lugar en el sistema Océano-Tierra-Atmósfera. Esta radiación llega a la superficie terrestre en las longitudes de ondas comprendidas entre los 100 y los 4000 (nm). La superficie de la Tierra, suelos, océanos y también la atmósfera, absorben energía solar y la reirradian en forma de calor en todas direcciones, distribuida desde el ultravioleta (UV, 100-400 nm) la cual constituye alrededor del 7% de la energía transmitida por el Sol, pasando por el visible (VI, 400-700 nm) y hasta el infrarrojo cercano (IR 700-4000 nm) [1]. La radiación solar puede ser medida con el instrumento universal conocido como piranómetro o albedómetro. A su paso por la atmósfera la radiación solar interactúa con los gases y partículas presente en este medio. Como consecuencia de esta interacción la radiación puede ser dispersada, convirtiéndose de esta forma en *radiación difusa* o alcanzar la superficie sin ser afectada, la que se considera entonces como *radiación directa*. En términos actinométricos la suma de estas dos radiaciones es considerada como la *radiación global* y aquella porción que llega a la superficie y no es absorbida, sino reflejada, se considera como *radiación reflejada*.

El albedo de superficie es otra magnitud que caracteriza la interacción de la radiación solar con el planeta. El estudio de esta variable permite establecer la relación que existe entre la cantidad de radiación reflejada por la superficie, respecto a la cantidad de radiación global incidente. Por esta razón, el valor del albedo es siempre menor o igual a la unidad [2].

El albedo depende de las propiedades de la superficie, así como, de sus condiciones: color, humedad, presencia o falta de vegetación, rugosidad, etc.

Existen diversos estudios sobre el albedo, entre ellos los llevados a cabo por Fairbairn [3], sobre los distintos tipos de albedo, las propiedades de las superficies y las leyes de las propiedades esféricas de Lambertian y Lommel-Seeliger. Las campañas de mediciones del albedo de superficie en la región espectral del UV-B, realizados en el Salar de Uyuni, donde debido a las características específicas de la superficie activa de esta región, los valores de albedo llegan a alcanzar máximos de prácticamente 0.5 [4]. Otros estudios han estado dirigidos a los análisis de corrección atmosférica para el cálculo del albedo empleando técnicas satelitales y su empleo en el georreferenciamiento [5]. Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que el cálculo del albedo, empleando técnicas satelitales, generalmente subestima el valor de esta variable sobre áreas con vegetación.

Los resultados obtenidos tendrán gran importancia para, entre otros, parametrizar el código de transferencia radiativa empleado por el Grupo de Óptica Atmosférica de Camagüey (GOAC) desarrollado en el Laboratorio de Dinámica de los Fluidos Geofísicos (GFDL, por sus siglas en inglés) perteneciente a la NOAA [6]. Este código radiativo ha sido adaptado por el GOAC a las condiciones locales y empleado por dicho grupo para los estudios relacionados con la radiación solar y su interacción con la atmósfera.

2. Materiales y Métodos

Existen diversas clasificaciones o tipos de albedo, entre los más generales se encuentra el *albedo geométrico*, también conocido como *albedo físico*, el cual se refiere a la “reflectividad” de cuerpos del sistema solar y su principal característica es que su medición se realiza con un ángulo de fase igual a cero, o sea, desde la misma fuente emisora. Otra definición es el *albedo esférico* o *albedo de Bond* para el cual se considera la fracción de radiación retrodispersada teniendo en cuenta todas las longitudes de onda y todos los ángulos de fase. El *albedo hemisférico*, por su parte, considera la fracción de radiación que es reflejada por una superficie en todas direcciones, como función del ángulo de incidencia. Esta será la definición de albedo empleada en el presente estudio.

La Estación Actinométrica de Camagüey (EAC) comenzó sus mediciones a partir del 1^o de abril de 1969 y se mantienen hasta la actualidad, por lo que cuenta con más de 40 años de mediciones. Según se establece en la Guía para Prácticas Climatológicas (GPC, en lo sucesivo) de la Organización Meteorológica Mundial [7, 8], se denomina Normal Climatológica Estándar al promedio de datos climáticos para períodos consecutivos de 30 años. De acuerdo a los pocos registros existentes, todo parece indicar que los primeros años de mediciones en la EAC constituyeron un período de pruebas y ajustes, dada la diversidad de horarios en los que se hicieron las observaciones y los tipos de variables a medir en cada uno de ellos. La mejor información disponible sobre este período inicial de trabajo ha sido brindada por el personal que trabajó en aquel entonces [9] y las libretas de asentamiento de las observaciones actinométricas.

Entre otros, los aspectos antes mencionados sustentaron el criterio de selección temporal de la climatología de la radiación solar para la EAC [10], comprendido entre el 1^o de enero de 1981 y el 31 de diciembre de 2010, cumpliendo de esta forma con el período de 30 años establecido en la GPC para normas climatológicas. Para el presente estudio se empleará este mismo período de tiempo, ya que en el mismo se ha garantizado una alta calidad de los datos y completar al máximo la serie.

Los datos empleados corresponden a las mediciones diurnas horarias de actinometría. Estas mediciones se realizan empleando una estación actinométrica manual del tipo Yanishevski, la cual consta de los siguientes instrumentos: actinómetro, albedómetro o piranómetro, balanzómetro y los galvanómetros acoplados a los mismos [11, 12]. Los datos del albedo de superficie se toman solamente en los horarios comprendidos entre las 10:00 y las 15:00, para un total de seis horarios. Se emplearon para el presente estudio solamente los valores de albedo correspondientes a los estados del disco solar: Sol al Cuadrado (\odot^2) y Sol Solo (\odot). Ambos estados del disco solar garantizan que la radiación directa siempre alcance la superficie terrestre, de acuerdo a lo establecido en el Manual de Procedimientos para la Realización de Observaciones Actinométricas (MPROA) [13].

Las observaciones actinométricas manuales se realizan cada hora desde la salida hasta la puesta del sol. Las horas de la primera y última observación varían dependiendo de la época del año. El albedo de superficie se calcula a partir de las mediciones diurnas horarias actinométricas, pero solamente se consideran válidas aquellas que se realizan en los horarios comprendidos entre las 10:00 y las 15:00 Hora Local (HL), según se establece en el MPROA.

De esta forma se garantiza que el camino óptico y por tanto la masa óptica que debe atravesar la radiación solar a su paso por la atmósfera es menor, garantizando condiciones prácticamente ideales para el cálculo de esta variable. Como resultado entonces de un día de trabajo, deben realizarse 6 mediciones de albedo dentro de los horarios antes mencionados. La cantidad de observaciones en un mes pueden ser iguales o superiores a 180 mediciones, resultando en más de 2200 valores de albedo al año. La cantidad de observaciones por horarios, meses y años, puede verse afectada por varias razones, entre las que se encuentran: el estado del disco solar, fenómenos atmosféricos, afectaciones en el instrumental y otras. Para el estudio del albedo solo se emplean las mediciones realizadas bajo condiciones de estado del disco solar nombradas anteriormente. Esta clasificación se hace atendiendo a lo establecido en el MPROA, donde la premisa fundamental es la medición de irradiancia directa, como se muestra a continuación:

Sol al Cuadrado: En el disco solar y en una zona de 5° alrededor del mismo no hay ni trazas de nubes, niebla, bruma, humo o polvo.

Sol: El sol ilumina a través de una capa de nubes, de niebla, humo o polvo y la sombra de los objetos circundantes, el parasol y el anillo niquelado de colimación son precisos y es posible colimar el actinómetro.

Para calcular el albedo de superficie cuyo valor es adimensional y se define como “la capacidad de reflexión” de una superficie, se emplea la siguiente ecuación:

$$Ac = \frac{Rc}{Q} \tag{1}$$

Donde:

Ac: Albedo (onda corta)

Rc: Radiación reflejada de la superficie de la capa activa (onda corta)

Q: Radiación global.

El albedo de una superficie activa está determinado por el estado físico de ésta y su composición. En la siguiente tabla se aprecia que la combinación predominante es la Verde-Seca con un (90.9 %) de ocurrencia, seguida de Seca-Seca con un (5 %) y Verde-Húmeda (3.5 %). Para la muestra estudiada no se ha registrado la combinación Amarilla-Húmeda y en ningún caso, la superficie activa se ha encontrado anegada en el momento de la observación. La combinación de menor ocurrencia es Seca-Húmeda con tan solo un (0.1 %).

TABLA 1: Cantidad de observaciones por combinaciones del estado de la superficie activa.

	Seca	Húmeda	Anegada
Verde	21553	841	-
Seca	1182	33	-
Amarilla	111	-	-

Durante el período de 30 años de mediciones de albedo deberían haberse realizado un total de 65 742 observaciones de esta variable, sin embargo, debido a fenómenos meteorológicos, mantenimientos y roturas en la EAC, entre otras causas, solamente se cuenta con un total de 59 669 valores, lo que constituye el 90.8 %. Entre las observaciones dejadas de realizar existen períodos de larga duración (un mes o más) en los que por diferentes razones no se realizaron observaciones actinométricas.

A los datos de albedo, para ambos estados del disco solar, se le realizó un proceso de control de calidad por lo que fueron eliminados aquellos valores mayores que la unidad e inferiores a cero. El total de observaciones realizadas en el período para condiciones de Sol y Sol al Cuadrado asciende a 23 899 para un (40.1 %), de ellas 21 237 (88.9 %) corresponden a condiciones de Sol y 2 662 (11.1 %) al estado de Sol al Cuadrado. No se han tenido en cuenta para el presente estudio las observaciones que no cumplen con el criterio del estado del disco solar anteriormente mencionado, en total, 31 477 observaciones fueron desechadas por esta razón constituyendo el (52.8 %). En el período se dejaron de realizar un total de 4 692 observaciones horarias, fundamentalmente por fenómenos meteorológicos, lo que representa el (7.9 %). Las observaciones con valores de albedo superiores o iguales a 0.4 suman un total de 69 (0.1 %) y los valores de albedo inferiores a cero fueron solamente dos casos.

Para el análisis del período objeto de estudio se determinaron las medias horarias, mensuales, anuales y multianuales. Se analizó el comportamiento por épocas del año, así como, para los períodos lluvioso y poco lluvioso.

3. Resultados

De acuerdo a lo expresado anteriormente, para superficies activas donde predomina el pasto o césped, los valores típicos de albedo se encuentran entre 0.20 y 0.25. El error absoluto determinado para el cálculo del albedo es de 0.031, por lo que se considera que el empleo de dos cifras decimales garantiza la exactitud de los cálculos. No obstante, en algunos casos se analizan los valores de albedo con tres cifras decimales con el objetivo de resaltar las pequeñas diferencias existentes. Se ha determinado que para la

EAC el valor medio del albedo es de 0.21, con una desviación estándar de 0.04 y un coeficiente de variación de solamente 19.96 %. Este valor medio del albedo, para todo el período, se corresponde con la distribución de frecuencias que se muestra en la Fig. 1, donde puede apreciarse que los valores de albedo están centrados en torno al valor de 0.20, seguido de valores en torno a 0.22.

El valor de la mediana de 0.21 y de la moda de 0.20, se encuentran en el mismo rango que los valores de la media y la distribución de frecuencia mostrada. El 74.8 % de la muestra empleada en el presente estudio se encuentra entre ± 1 desviación estándar. Estos resultados, junto a otros criterios, permiten considerar que el albedo de superficie para la EAC tiene una distribución normal.

El mínimo valor absoluto del albedo para todo el período tuvo lugar el 18 de marzo de 1985 con una magnitud de 0.02, mientras que el máximo absoluto alcanzó el valor de 0.40 el 12 de abril de 1984. Estos valores extremos se encuentran precisamente en los años donde mayor dispersión existe de los datos en todo el período, como será abordado posteriormente.

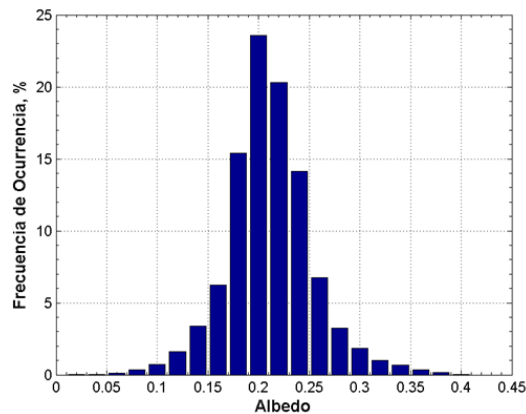


Fig. 1. Distribución de frecuencias de valores del albedo de superficie para todo el período.

3. a Medias anuales y multianuales.

La Fig. 2 muestra todos los valores de albedo correspondientes a observaciones de Sol y Sol al Cuadrado para todo el período. Los espacios en blanco que se presentan desde mediados de 1996 y hasta finales del propio año y de finales de 2005 a mediados de 2006, corresponden a falta de datos por mantenimiento, calibración, sensores afectados por humedad y falta de libros, entre otros. Desde 1981 hasta alrededor de 1998 se aprecia una mayor dispersión en los valores de albedo respecto al período de mediados de 1998 y hasta el 2010, donde como puede apreciarse los datos se encuentran más agrupados.

La tendencia, decreciente en este caso, de los valores de albedo para todo el período ha sido representada en el gráfico por una línea punteada, con una pendiente de -10^{-7} , que aunque con un bajo factor de determinación $R^2 = 0.046$, su significación estadística es del 99.99%. Esta tendencia decreciente es consistente con la tendencia, también decreciente de la irradiancia de onda corta reflejada y la irradiancia global obtenida para la climatología de la radiación solar de la EAC [10].

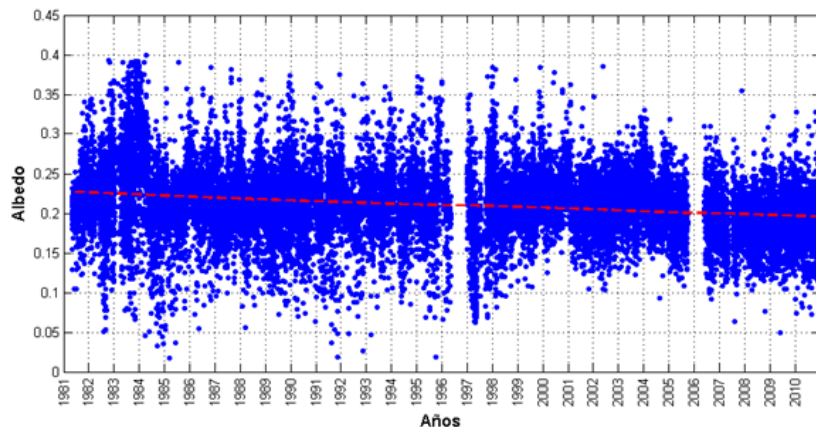


Fig. 2. Representación de todos los datos de albedo correspondientes al período 1981 - 2010, para estados del disco solar de Sol y Sol al Cuadrado y línea de tendencia de los valores de albedo para el período.

Desde 1981 y hasta alrededor de 1998 se aprecia una mayor dispersión en los valores de albedo respecto al período que cubre desde mediados de 1998 hasta el 2010, donde existe una mejor agrupación de los datos como puede apreciarse. Resaltan en la figura anterior los valores relativamente altos entre 1983 y 1984 y la concentración de valores bajos de albedo durante la primera parte de 1997. En este último caso, la aparición por vez primera en la serie de la combinación de estados de la superficie activa: Amarilla-seca, con valores superiores al 30 % y la consiguiente disminución de la frecuencia de ocurrencia del estado: Verde-Seca, pudieran estar relacionada con los bajos valores de albedo. Sin embargo, para el resto de los casos antes mencionados, no se ha encontrado una explicación satisfactoria.

En el análisis de las medias mensuales para todo el período objeto de estudio (Fig. 3), se aprecia claramente que la mayor parte de los valores de albedo se encuentran en el rango comprendido entre 0.25 y 0.15, con una clara tendencia decreciente, también mostrada en la Fig. 2. En este caso con una pendiente ligeramente superior (-9×10^{-5}) y un factor de determinación de $R^2 = 0.179$, superior al del análisis de toda la muestra y al igual que para el caso de todos los datos, se considera estadísticamente significativa en un 99.99%

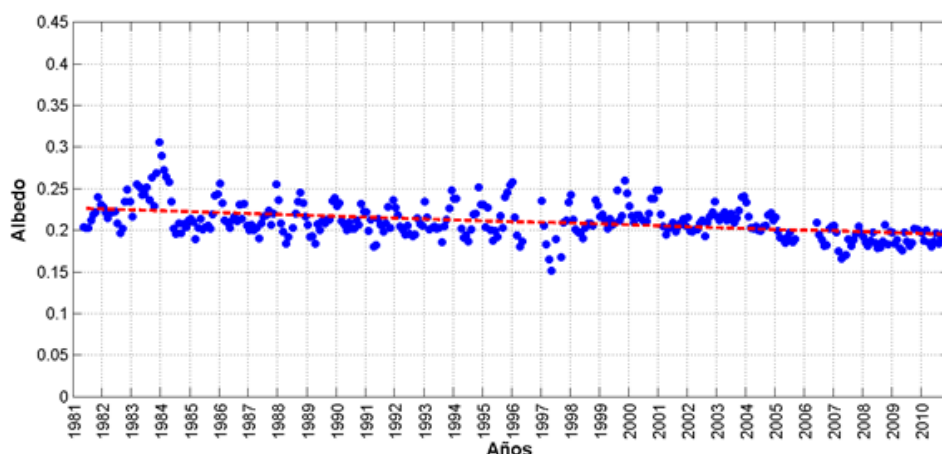


Fig. 3. Comportamiento de todas las medias mensuales del albedo para todo el período, incluyendo la línea de tendencia.

Durante los últimos siete años, o sea, el período comprendido entre el 2005 y el 2012, prácticamente todos los valores medios mensuales del albedo son iguales o inferiores a 0.20. En 1997 se aprecia claramente la disminución significativa del albedo, respecto a la tendencia de los valores de esta variable, asociadas a la explicación brindada más arriba. Igualmente es notable el incremento significativo durante los años 1983 y 1984, donde tienen lugar valores máximos medios anuales del albedo, para todo el período. Al año 1983 corresponde también el máximo valor de desviación estándar del período con 0.07, seguido del año 1997 donde esta magnitud alcanza el valor de 0.06.

Los valores medios anuales mínimos de albedo están ubicados entre los años 2007 y 2010 con valores de 0.19. La menor desviación estándar de todo el período se alcanza en los años 2000 y 2004, con una magnitud de 0.03.

A partir del año 2000, cuando tiene lugar el mínimo valor de desviación estándar, se encuentran los menores valores de desviación estándar de todo el período, con magnitudes inferiores a 0.035, consistente con el mejor agrupamiento del albedo durante estos años reflejado en la Fig. 3. Desde el año 2005 y hasta el 2010, todos los valores medios anuales se encuentran por debajo de 0.20, lo cual podría indicar un cambio paulatino de tipo de superficie activa, desde condiciones de pasto (albedos entre 0.20 y 0.25) a superficies activas consideradas como suelo seco. Esta categoría se encuentra entre los valores de albedo de 0.15 a 0.25.

3. b Medias mensuales del albedo.

Los valores medios mensuales del albedo, así como, sus respectivas desviaciones estándar para todos los casos analizados, además de los valores medios mensuales de irradiancia global se muestran en la Fig. 4. Se aprecia claramente en la figura que la insolación global y el albedo de superficie se encuentran en contrafase.

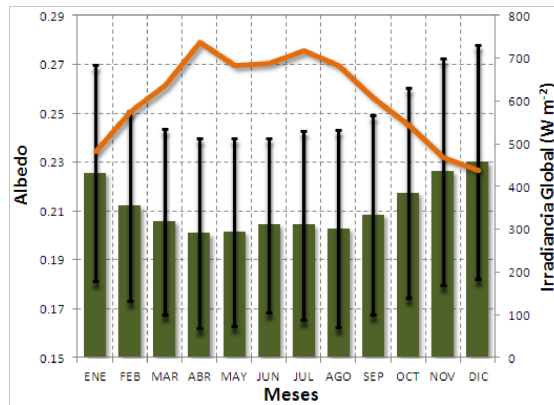


Fig. 4. Medias mensuales y desviaciones estándar del albedo de superficie y valores medios mensuales de la Irradiancia Global, para el período 1981-2010.

Al analizar el comportamiento de las medias mensuales se aprecia que los valores máximos se encuentran durante los meses extremos del año, entiéndase desde enero hasta marzo y desde octubre a diciembre. El máximo principal se encuentra en este último mes con un valor de 0.23, seguido de los meses de enero y noviembre, en ambos casos, con una magnitud de 0.226. Los valores de la desviación estándar alcanzan también durante este período sus máximos valores, precisamente en los meses de noviembre y diciembre con un valor de 0.05.

Los valores mínimos se encuentran durante los meses centrales del año, en este caso desde abril hasta septiembre, con el mínimo absoluto en el mes de abril y una magnitud de 0.201, seguido del mes de mayo con 0.202, ambos con iguales valores de desviación estándar (0.039). El mínimo valor de la desviación estándar se encuentra sin embargo en el mes de junio con una magnitud de 0.036. Cabe destacar que dentro de los valores mínimos tienen lugar dos máximos durante los meses de junio y julio con valores de albedo de 0.204 en ambos casos.

El máximo valor de la irradiancia global coincide con el mínimo valor de albedo al igual que el mínimo valor de irradiancia global coincide con el máximo del albedo, sin embargo, con los máximos que tienen lugar dentro de los valores mínimos, no existe coincidencia y están desfasados en un mes. Al comparar los valores de albedo con los de la irradiancia global se aprecia una buena correlación entre ellas alcanzando un valor de 0.97. Por su parte la correlación entre los valores medios mensuales de albedo y de irradiancia de onda corta reflejada alcanza solamente el valor de 0.95, inferior al alcanzado entre los valores medios mensuales de albedo y de la irradiancia global. Estos resultados entonces permiten plantear que la variable mejor correlacionada con el albedo es la irradiancia global.

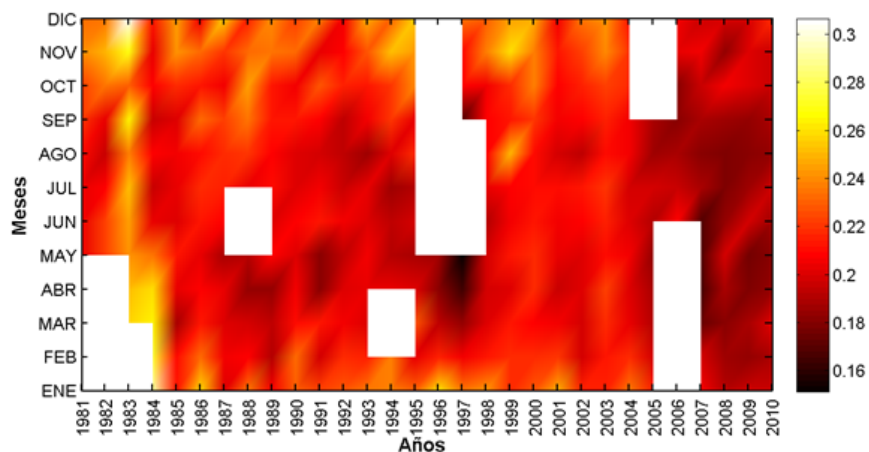


Fig. 5. Distribución de valores medios mensuales del albedo de superficie por años para el período 1981-2010.

La figura 5 corrobora los resultados mostrados en la figura anterior, en este caso, se representan los valores medios mensuales por años y meses para el período objeto de estudio. Los espacios en blanco corresponden a los meses en los cuales faltan observaciones, cuyas causas fueron abordadas anteriormente, por lo que no es posible calcular los valores medios correspondientes. Coincidiendo con lo

representado en la Fig. 4, los valores mínimos de albedo se encuentran fundamentalmente en los meses de abril y mayo. En este caso resalta el mínimo del año 1997 entre los meses de abril y mayo.

Por su parte, los máximos tienen lugar en los meses extremos de los años, como ha sido mencionado anteriormente, con magnitudes significativas en los años 1983 y 1984, durante los meses de diciembre y enero, respectivamente. Este resultado fue también abordado en el análisis multianual del epígrafe anterior. Se aprecia claramente también la considerable disminución de los valores medios del albedo durante los años a partir del 2000 y hasta el 2010.

En el análisis por estaciones del año (Fig. 6), los mínimos, coincidiendo con análisis previos, se encuentran en los meses centrales del año, aunque en este caso el mínimo absoluto se encuentra durante el verano (JJA) con valores de 0.204 y desviación estándar de 0.038. A este valor lo sigue la primavera, con un valor medio de albedo de 0.206 e igual valor de desviación estándar que para el verano.

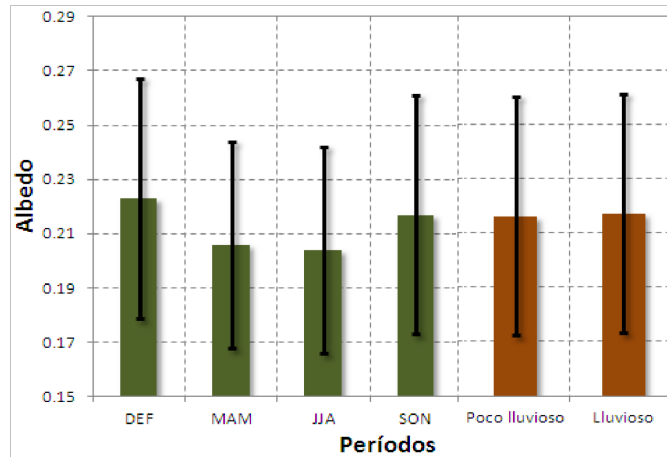


Fig. 6. Valores medios y desviación estándar del albedo de superficie por períodos estacionales.

Los máximos por estaciones, coincidiendo nuevamente con análisis anteriores, se encuentran en los meses extremos, donde sobresale el período del invierno (DEF), con valores de 0.223 y una desviación estándar de 0.044, la misma que para el período SON.

Al analizar los períodos Lluvioso (Mayo - Octubre) y Poco Lluvioso (Noviembre - Abril), se aprecia que prácticamente tienen el mismo valor medio de albedo (0.217 y 0.216, respectivamente) y en ambos casos, la desviación estándar es de la misma magnitud (0.044). Estos valores demuestran que no existe una relación directa de los valores medios del albedo con respecto a estos dos períodos, contrario a lo que ocurre cuando se analizan por separados las cuatro estaciones del año, donde sí se aprecia una diferencia, aunque no considerable, entre las estaciones.

3. c Medias horarias del albedo.

El comportamiento medio horario del albedo de superficie, con sus respectivos valores de desviación estándar para el período analizado, así como, los valores medios horarios de la irradiancia global se muestran en la Fig. 7. Al igual que en el análisis del comportamiento medio mensual del albedo, los valores de esta variable se encuentran en contrafase con los de la irradiancia global. Los máximos valores, tanto del albedo como de la desviación estándar se encuentran en el horario de las 15:14 HL con magnitudes de 0.228 y 0.044, respectivamente, horario donde tiene lugar el mínimo de la irradiancia global.

En el horario de las 12:14 HL coinciden, igualmente, los valores mínimos del albedo así como, de la desviación estándar, en este caso con magnitudes de 0.203 y 0.038, los valores de la desviación estándar como promedio se encuentran alrededor de 0.04. En el horario del medio día ocurre el máximo valor de la irradiancia global en contrafase con el comportamiento del albedo. Al igual que en el análisis de las medias mensuales, las mejores correlaciones de las medias horarias del albedo se encuentran con los valores medios horarios de la irradiancia global, no existe una buena correlación entre los valores de albedo y la frecuencia de ocurrencia de las combinaciones de estados de la superficie activa.

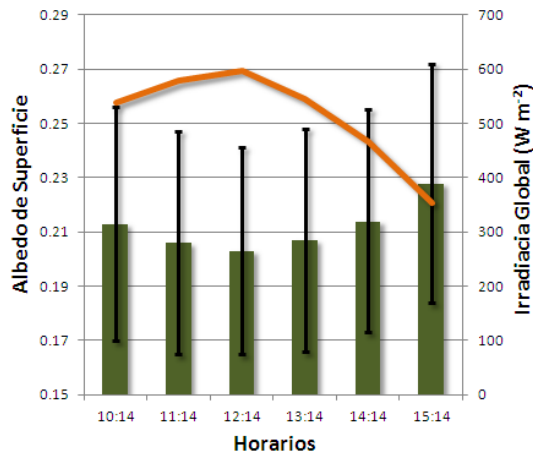


Fig. 7. Valores medios horarios y desviación estándar del albedo de superficie, así como, las medias horarias de la irradiancia global para el período 1981-2010.

Al analizar el comportamiento de los valores medios horarios del albedo de superficie por meses (Fig. 8), se reafirma el hecho de que los valores mínimos se encuentran durante el horario del mediodía. Coincidiendo con el análisis de las medias mensuales, se puede apreciar que el mínimo valor del albedo se encuentra entre los meses de abril y agosto. Los máximos por su parte se encuentran en los horarios extremos del día y en los meses de invierno, reafirmando los resultados anteriormente mostrados.

Entre los horarios de las 11:14 y 12:14 HL, y en el mes de abril, se encuentran los valores mínimos del albedo con magnitudes alrededor de 0.19. Como promedio, durante el mes de junio el mínimo tiene un desplazamiento hacia el horario de las 13:14 HL y nuevamente en el mes de agosto el mínimo tiene lugar al mediodía.

Los valores máximos medios del albedo que tienen lugar en los horarios extremos del día son más notorios en los meses de invierno, sobre todo en los meses finales del año. Llegando a alcanzar los máximos valores, en torno a los 0.25 durante los meses de noviembre y diciembre en el horario de las 15:14 HL.

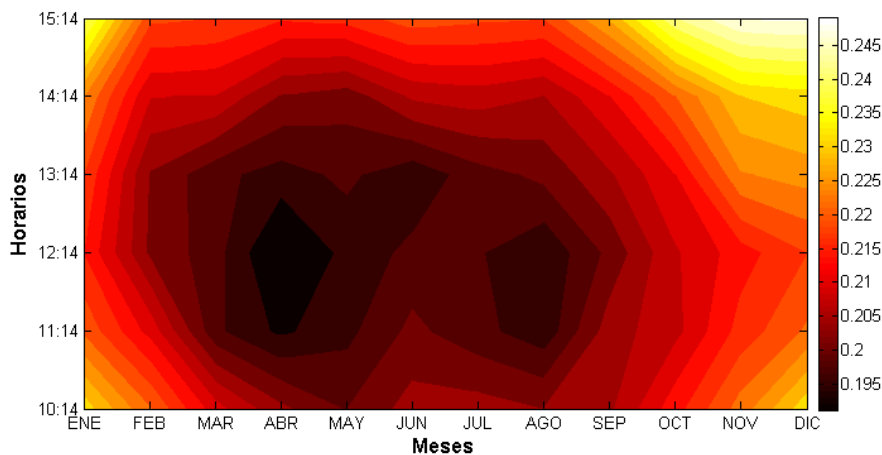


Fig. 8. Distribución de los valores medios horarios del albedo de superficie por meses para el período 1981-2010.

3. d Análisis de estados de la superficie activa.

En la siguiente figura se representa la distribución de frecuencias de las distintas combinaciones de estados de la superficie activa para todo el período, por meses, correspondientes a la cantidad de mediciones realizadas bajo el símbolo de Sol y Sol al Cuadrado. No existe una relación directa entre los valores medios mensuales de albedo y la frecuencia de ocurrencia de las distintas combinaciones. Tampoco se ha encontrado una relación directa entre los valores medios mensuales del albedo y la irradiancia de onda corta reflejada. Al analizar la correlación existente entre los diversos estados de la superficie activa y los valores medios del albedo de superficie, la mejor correlación se obtiene con la

combinación verde-húmeda con un coeficiente de correlación $R = 0.7$, en el resto de las combinaciones, todos los coeficientes de correlación se encuentran por debajo de 0.4 ($R < 0.4$).

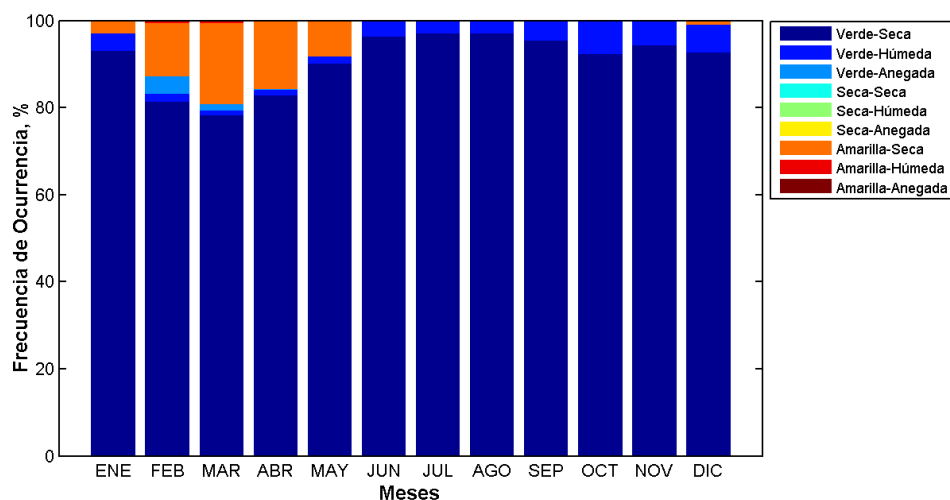


Fig. 9. Distribución de frecuencias de las combinaciones de estados de la superficie activa por meses para todos los casos analizados.

En la figura anterior se aprecia el predominio, prácticamente absoluto (90.9 %), durante todo el año del estado de la superficie activa Verde-Seca. En segundo lugar se encuentra la combinación Amarilla-Seca, con el 4.9 % de los casos, coincidiendo con el período Poco Lluvioso. Este valor representa una diferencia de 86 % con respecto a la combinación Verde-Seca, lo que demuestra el predominio de esta combinación sobre el resto. En tercer lugar la combinación Verde-Húmeda con un 3.6%, presente fundamentalmente a partir del inicio del período lluvioso.

Durante el período analizado no se registraron casos con reportes de humedad del suelo del tipo: Anegada, para ninguno de los tres estados de madurez de la hierba y tampoco fue reportada la combinación Seca-Húmeda.

En el análisis del comportamiento por años de las combinaciones de estados de la superficie activa, no mostrado en este trabajo, se encontró que entre los años 1981 y 1996 existe un predominio de la combinación Verde-Seca, seguida de la combinación Verde-Húmeda. En todos los casos las frecuencias de ocurrencia de la primera combinación superaron el 96 %, llegando al 100 % en el año 1996. En este año en particular no se dispone de datos de los últimos 7 meses del año, por lo que solamente se contempla el período seco, dando al traste con que en este año no se registrara ningún caso de la combinación Verde-Húmeda.

Como fue abordado en epígrafes anteriores, en el año 1997 aparece por vez primera para todo el período la combinación Amarilla-Seca con una frecuencia de ocurrencia del 32 %, lo que trajo aparejado la disminución de la frecuencia de ocurrencia de la combinación Verde-Seca hasta valores de 66 %. Igualmente, por primera vez en el período, aparecen las combinaciones Amarilla-Húmeda y Seca-Seca, pero con valores no significativos respecto al resto de las combinaciones. Con la excepción del año 1998, donde solamente se reportaron casos de las combinaciones Verde-Seca y Verde-Húmeda, este comportamiento se mantuvo hasta el año 2004 con tantos por cientos variables para las diferentes combinaciones.

La aparición del estado de la superficie activa de los tipos Amarilla y Seca, a partir de 1997, se debe a la aparición de períodos consecutivos de sequía, alcanzando su máxima expresión durante el período comprendido entre el año 2003 y 2005. Este período de sequía fue considerado como el evento de sequía más significativo desde 1961 en Cuba en general y en Camagüey en particular [14]. Estos eventos de sequía extrema provocaron un incremento en los reportes de casos de la combinación Seca-Seca (18 %) durante el año 2005, hasta ese momento solamente habían sido reportados con un 0.7 % de frecuencia de ocurrencia durante el año 1997. El resto de las combinaciones presentes este año fueron Verde-Seca con un 80 % de los casos y Verde-Húmeda con tan solo el 2 %.

En el análisis del comportamiento diurno de los estados de la superficie activa (no mostrado), no se han encontrado diferencias significativas entre horarios.

4. Conclusiones

Se ha establecido, por primera vez para la EAC, la climatología del albedo de superficie empleando para ello un período de 30 años que abarca desde el 1^{ro} de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre de 2010. Este trabajo constituye la primera climatología de esta variable para Cuba. Se determinó que el valor medio del albedo de superficie para la EAC tiene una magnitud de 0.21 y una mediana de 0.21, con una desviación estándar de 0.04 y un coeficiente de dispersión de tan solo 19.96 %. El comportamiento del albedo muestra una distribución normal, ejemplificada en la distribución de frecuencia obtenida (Fig. 1). El 74.8 % de los casos de la muestra se encuentran en el rango de ± 1 desviación estándar.

Se ha calculado la tendencia del albedo para el período objeto de estudio y se ha determinado que existe correspondencia entre esta y la tendencia decreciente de la radiación global establecida en otros estudios. El valor de la tendencia para el albedo es de -10^{-7} W m⁻² por meses y se considera estadísticamente significativa.

El análisis de las medias anuales ha arrojado que el máximo valor medio le correspondió al año 1983 con 0.26, mientras que el mínimo se alcanzó en los años 2007 y 2008 con igual magnitud 0.19. Durante los años comprendidos entre el 2000 y 2010 se registran los menores valores de albedo y las menores desviaciones estándar de todo el período con magnitudes inferiores a 0.04. El máximo medio mensual se registra en el mes de diciembre con 0.23 y el mínimo se registra en el mes de abril con 0.20, en ambos casos estos valores extremos tienen lugar en contrafase con los valores extremos de la irradiancia global. En el caso de los valores medios por horarios, el mínimo ocurre a las 12:14 HL con 0.20 y el máximo a las 15:14 HL con una magnitud de 0.23.

El análisis estacional arroja que durante el invierno (DEF) tiene lugar el máximo con un albedo medio de 0.22 mientras que el mínimo tiene lugar en el verano (JJA) con 0.20. En los períodos Lluvioso y Poco Lluvioso el albedo de superficie se comporta prácticamente invariable con un valor de 0.22 ± 0.04 .

Se determinaron las frecuencias de ocurrencia de las diferentes combinaciones de estados de la superficie activa y las posibles relaciones con los valores del albedo de superficie. De este análisis se ha determinado que la combinación predominante para la EAC es Verde-Seca con 90.9 % de frecuencia de ocurrencia. Durante el período analizado nunca se encontró la condición de humedad: anegada. Se ha comprobado la relación existente entre la frecuencia de ocurrencia de determinadas combinaciones de estado de la superficie activa con períodos de sequía en la provincia.